

PENGARUH PENGOMPOSAN LIMBAH LUMPUR IPAL DOMESTIK DENGAN KARAKTERISTIK FISIK-KIMIA DAN LOGAM BERAT KOMPOS

Dini Aryanti

Program Studi Teknik Sipil

Email : diniaryti@gmail.com

Abstrak

Kandungan organik yang tinggi pada limbah lumpur IPAL domestik membuat limbah lumpur dapat dikelola melalui proses pengomposan. Proses pengomposan ini akan mengubah limbah lumpur menjadi produk kompos yang bisa diaplikasikan ke tanah atau tanaman. Namun dikarenakan limbah lumpur memiliki kandungan logam berat maka perlu adanya pengecekan dan analisis mengenai kelayakan kompos yang dihasilkan untuk digunakan sebagai pupuk. Pada penelitian ini logam berat yang dianalisis adalah logam tembaga (Cu) dan limbah lumpur yang dijadikan kompos berasal dari IPAL Waduk Setiabudi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi logam Cu pada kompos akhir adalah 150 mg/kg. Besar konsentrasi logam Cu pada kompos menghasilkan faktor resiko ekologi yang masuk ke dalam kategori resiko rendah ($Er < 40$). Selain itu, proses pengomposan pada penelitian ini telah mengurangi efek toksisitas kedua logam. Pada akhir pengomposan, fraksi logam Cu pada kompos dominan pada fraksi organic bound yaitu sebesar 63,50%. Fraksi ini merupakan fraksi stabil sehingga keberadaan logam Cu tidak memberikan dampak negatif bagi lingkungan jika kompos tersebut diaplikasikan ke tanah.

Kata Kunci : *limbah lumpur, parameter fisik-kimia, pengomposan, spesiasi kimia logam berat*

PENDAHULUAN

Kebutuhan air bersih DKI Jakarta yang meningkat dikarenakan laju pertumbuhan penduduk yang tinggi menyebabkan produksi limbah yang dihasilkan pun turut meningkat baik limbah padat maupun limbah cair. IPAL Waduk Setiabudi merupakan sarana pengelolaan limbah cair di DKI Jakarta yang mengolah

limbah cair yang bersumber dari Setiabudi dan Tebet. Teknologi pengolahan yang digunakan adalah Aerated Lagoon. Produk sampingan yang dihasilkan dari pengolahan limbah ini adalah limbah lumpur. Limbah lumpur ini diambil dan diangkut truk oleh Dinas Pekerjaan Umum DKI Jakarta namun tidak dilakukan secara rutin sehingga menjadi kendala dalam operasional

IPAL. Nantinya limbah lumpur tersebut langsung dibuang ke Sungai Banjir Kanal Timur tanpa pengolahan terlebih dahulu sehingga dapat menjadi sumber pencemar bagi lingkungan.

Oleh karena itu perlu adanya alternatif pengolahan limbah lumpur untuk meminimalisir pencemaran lingkungan. Salah satu alternatif yang dapat dilakukan adalah pengomposan. Proses pengomposan dapat membunuh patogen karena menghasilkan panas selama fase termofilik, dan kandungan organik dalam lumpur akan dikonversi menjadi zat humus yang stabil. Namun disamping memiliki keuntungan, pupuk dari limbah lumpur dapat menimbulkan resiko bagi kesehatan manusia dikarenakan limbah lumpur memiliki polutan berupa logam berat yang dapat bermigrasi ke air tanah dan terakumulasi pada tanaman (Amir et al., 2005).

Pada proses pengomposan, dekomposisi senyawa organik akan menyebabkan perubahan parameter fisik kimia kompos seperti kadar air, C/N, suhu dan parameter lainnya. Parameter tersebut penting untuk dinilai selain berguna untuk menghasilkan kualitas kompos yang sesuai standar, tetapi juga

akan mempengaruhi konsentrasi dan distribusi logam berat pada kompos. Konsentrasi dan distribusi logam yang berbeda pada campuran kompos akan memberikan efek toksisitas yang berbeda pula pada lingkungan.

Konsentrasi logam berat pada kompos penting untuk dianalisa karena mengindikasikan tingkat kontaminan. Sedangkan spesiasi kimia logam bertujuan untuk menilai mobilitas, bioavailabilitas, dan kelayakan suatu kompos untuk diterapkan di lahan pertanian. Logam berat yang ditinjau pada penelitian ini adalah logam tembaga (Cu). Hal ini dikarenakan dari hasil pemeriksaan karakteristik awal limbah lumpur IPAL Waduk Setiabudi, logam Cu merupakan logam dengan konsentrasi tertinggi.

METODE

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah lumpur yang dan daun kering sebagai bulking agent dengan perbandingan lumpur:bulking agent adalah 1:1. Menurut Tchobanoglous et al (2002) rasio C/N awal campuran kompos yang optimal untuk proses pengomposan berada dalam rentang 20-30. Berdasarkan perhitungan, jika ingin memperoleh rasio C/N campuran awal kompos sebesar 21 maka rasio proporsi limbah lumpur dan daun kering adalah 1:1.

Awalnya dilakukan pengeringan terhadap limbah lumpur untuk mengurangi kadar air berlebih. Sedangkan untuk daun kering dicacah terlebih dahulu agar ukurannya lebih kecil. Setelah itu limbah lumpur dan daun kering dicampur sesuai dengan proporsinya masing-masing dan dilakukan penggundukan. Metode pengomposan yang dilakukan adalah dengan sistem windrow. Pengadukan dilakukan secara berkala pada gundukan kompos untuk kebutuhan aerasi kompos. Sampel kompos diambil secara berkala dan dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pemeriksaan terhadap karakteristik fisik kimia dan logam berat kompos.

Adapun karakteristik fisik kimia yang akan ditinjau adalah kadar air, kandungan bahan organik, suhu, dan rasio C/N. Sedangkan karakteristik logam beratnya adalah konsentrasi total dan spesiasi logam Cu. Pemeriksaan kadar air dilakukan dengan melakukan pemanasan sampel pada suhu 105°C selama 3 jam, dan kandungan bahan organik diperoleh dari hasil pemanasan kembali sampel pada suhu 550°C selama 1 jam. Suhu kompos diukur secara langsung pada gundukan kompos dengan

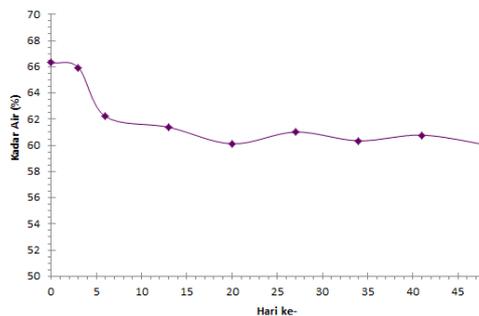
menggunakan termometer digital. Kadar karbon diukur dengan metode spektrofotometri dan kadar nitrogen diukur dengan metode Kjeldahl. Pemeriksaan konsentrasi total logam dilakukan menggunakan AAS (Atomic Absorption Spectrometer) dengan sebelumnya dilakukan digesti pada sampel dengan menggunakan larutan HNO₃ dan HClO₄ pada suhu 200°C. Sedangkan pemeriksaan terhadap distribusi fraksi logam Cu dilakukan dengan metode ekstraksi bertahap (*sequential extraction*) yang pertama kali dikembangkan oleh Tessier et al (1979) dan telah banyak digunakan dalam studi logam berat pada limbah lumpur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Parameter Kadar Air

Secara garis besar, kadar air pada kompos mengalami tren penurunan (lihat Gambar 1). Villasenor et al (2011) menyatakan bahwa proses pengomposan akan menghasilkan pengurangan kadar air pada campuran kompos yang disebabkan oleh penguapan akibat panas yang ditimbulkan dari aktivitas mikroorganisme. Pada akhir pengomposan, nilai kadar air kompos adalah sebesar 60,05% atau mengalami pengurangan sebesar 6,26% dari kadar air awal. Nilai pengurangan kadar air pada penelitian ini mendekati dengan penelitian yang dilakukan oleh Rodriguez et al (2012)

dimana pengurangan kadar air kompos sebesar 5-10% pada pengomposan limbah lumpur dengan variasi jenis bulking agent yaitu serpihan kayu, serbuk gergaji, dan jerami.

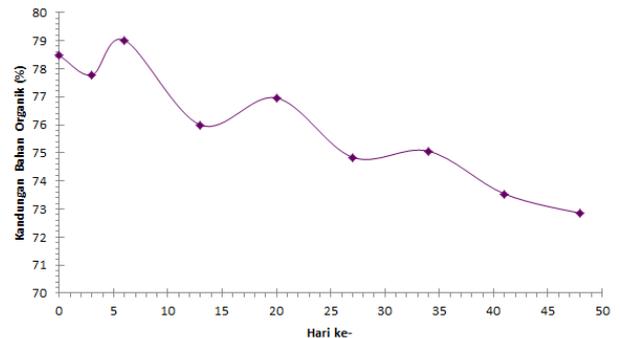


Gambar 1. Grafik Perubahan Kadar Air Pada Kompos

2. Parameter Kandungan Bahan Organik

Dari awal hingga akhir proses pengomposan, perubahan kandungan bahan organik pada kompos berfluktuasi, namun jika dilihat pada Gambar 2 maka kandungan bahan organik memiliki kecenderungan menurun seiring dengan lamanya proses pengomposan. Kandungan bahan organik awal pada kompos adalah sebesar 78,47% dan pada akhir pengomposan menurun menjadi 72,85%, atau terjadi pengurangan kandungan bahan organik sebesar 5,62%. Penurunan kandungan bahan organik disebabkan karena bahan organik tersebut mengalami

dekomposisi oleh mikroorganisme pengurai dimana akan menstimulasi pembentukan zat humus yang stabil melalui proses mineralisasi (Banegas et al, 2007).

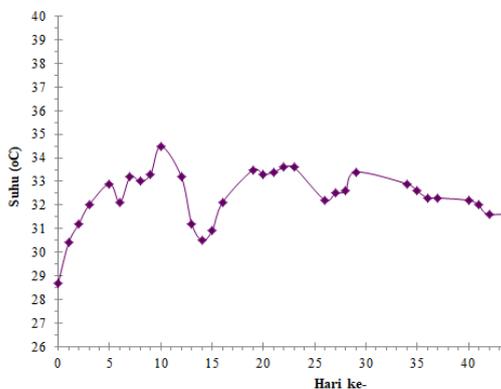


Gambar 2. Grafik Perubahan Kadar Bahan Organik Pada Kompos

3. Parameter Suhu

Suhu awal pada kompos adalah sebesar 28,7°C. Pada hari-1 pengomposan terjadi kenaikan suhu yaitu menjadi 35,1°C. Suhu terus cenderung mengalami kenaikan hingga hari ke-10 pengomposan yang merupakan hari tercapainya suhu maksimum yaitu 34,5°C. Peningkatan suhu pada awal pengomposan ini dikarenakan ketersediaan substrat organik yang banyak sehingga menyebabkan aktivitas mikroorganisme yang tinggi. Adanya peningkatan aktivitas dekomposisi oleh mikroorganisme ini yang menyebabkan kenaikan suhu pada kompos. Setelah mencapai suhu maksimum pada hari ke-10, suhu pada kedua kompos mengalami penurunan dan perubahan suhu cenderung stabil hingga akhir pengomposan. Banyak

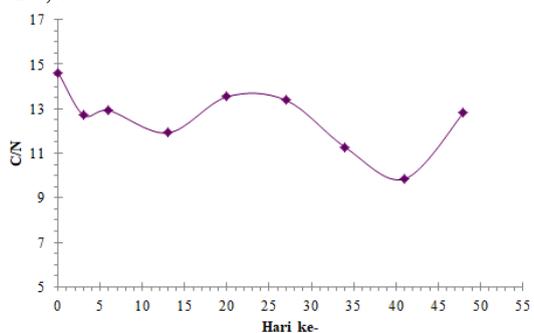
faktor yang berpengaruh terhadap perubahan suhu pada kompos, salah satunya adalah kadar air. Kelembaban yang berlebihan dari kompos dapat menghambat sirkulasi oksigen pada pori-pori kompos sehingga menyebabkan efek merugikan pada suhu kompos (Kalamdhad et al, 2009). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kadar air awal pada campuran kompos adalah 66,31%. Tingginya kadar air awal pada kedua campuran kompos merupakan salah satu penghambat tercapainya suhu yang tinggi pada kompos. Meskipun demikian, pada rentang suhu di pengomposan ini dekomposisi bahan organik tetap dapat terjadi dikarenakan bakteri masih dapat tumbuh pada rentang suhu yang ada, hanya saja tidak tercapainya suhu tinggi dapat menjadi indikasi bahwa dekomposisi berjalan secara lambat.



Gambar 3. Grafik Perubahan Suhu Pada Kompos

4. Parameter C/N

Jika dilihat pada Gambar 4 maka perubahan rasio C/N pada kompos cenderung menurun. Penurunan rasio C/N pada pengomposan merupakan hasil dari aktivitas mikroba dalam menguraikan bahan organik yang ada pada campuran kompos (Kalamdhad et al, 2009). Pada penelitian ini, rasio C/N pada akhir pengomposan yang terdapat pada kompos adalah sebesar 12,81. Rasio C/N akhir kedua kompos ini menunjukkan nilai yang baik menurut Bernal et al (2009) yang menyatakan bahwa salah satu indikasi kematangan kompos dari limbah lumpur adalah rasio C/N berada sekitar 12. Penurunan rasio C/N pada penelitian ini sejalan dengan Nomeda et al (2008) yang melakukan pengomposan limbah lumpur dengan *bulking agent* berupa serbuk gergaji dan juga menunjukkan penurunan C/N yaitu sebesar 11,1% dimana C/N awal adalah sebesar 30,5 dan pada akhir pengomposan menjadi 19,4.



Gambar 4. Grafik Perubahan C/N Pada Kompos

5. Parameter Konsentrasi

Logam Cu

Konsentrasi logam Cu mengalami penurunan hingga akhirnya pada akhir pengomposan konsentrasi logam Cu adalah sebesar 150 mg/kg. Menurut Amir et al (2005), proses pengomposan dapat menyatukan (*concentrate*) atau melemahkan (*dilute*) logam berat pada limbah lumpur. Penurunan jumlah logam pada limbah lumpur bergantung dari logam yang hilang melalui *leaching*. Kehilangan logam ini

6. Parameter Distribusi Fraksi

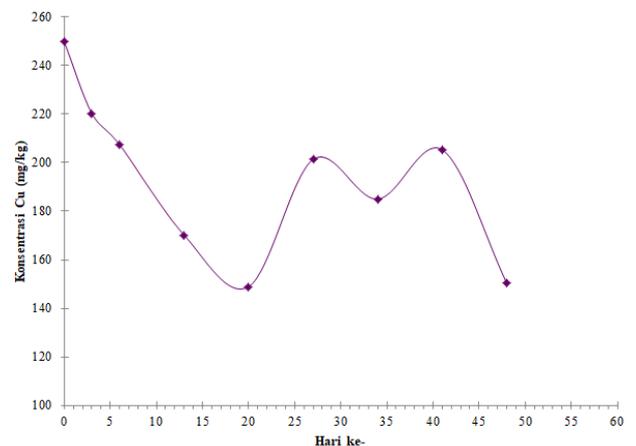
Pengomposan akan menghasilkan perkembangan populasi mikroba yang menyebabkan terjadinya variasi dari perubahan fisik-kimia pada campuran kompos. Perubahan tersebut dapat mempengaruhi distribusi logam melalui beberapa faktor seperti lepasnya logam selama mineralisasi bahan organik, solubilisasi logam oleh penurunan pH, biosorpsi logam oleh biomassa mikroba, kompleksasi logam dengan zat humus yang baru terbentuk, dan faktor lainnya (Ahmed et al, 2007). Perubahan terhadap bentuk fraksi *exchangeable (F1)*, *carbonate bound (F2)*, *reducible (F3)*, *organic bound (F4)*, dan *residual (F5)* dari logam Cu pada kompos

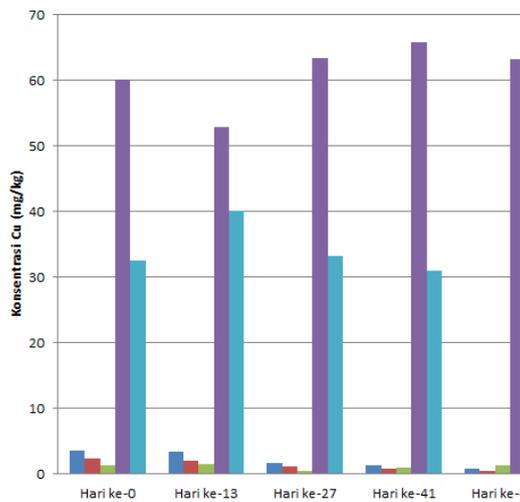
umumnya terjadi pada fase termofilik dan dapat dikaitkan dengan lepasnya logam dari bahan organik terdekomposisi, peningkatan kadar air, perubahan kondisi oksidasi dan anionik media yang mana hal-hal tersebut dapat meningkatkan solubilitas logam (Ahmed et al, 2007). Pada penelitian ini, penurunan konsentrasi logam Cu dapat

dikarenakan terlarutnya logam Cu pada air lindi yang dihasilkan.

Gambar 4. Grafik Perubahan Konsentrasi Logam Cu Pada Kompo

Logam Cu dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah :



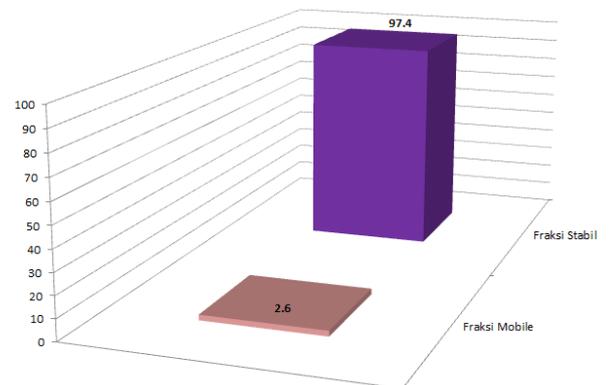


Gambar 4. Grafik Perubahan Fraksi Logam Cu Pada Kompos

Menurut Nomedo et al (2008), logam yang berada pada fraksi *exchangeable (F1)*, *carbonate bound (F2)*, dan *reducible (F3)* merupakan logam yang bersifat *mobile* dan *bioavailable*. Sedangkan fraksi *organic bound (F4)* dan *residual (F5)* merupakan fraksi logam yang bersifat stabil dan *non-bioavailable*. Jika dilihat pada Gambar 5 dapat diketahui bahwa logam Cu dominan berada pada fraksi *organic bound* dan diikuti oleh fraksi *residual* pada seluruh tahapan pengomposan. Pada akhir pengomposan, fraksi *organic bound* dan *residual* pada kompos adalah sebesar 62,60% dan 30,46% dari konsentrasi total Cu. Logam yang berada pada fraksi *organic bound* dianggap sebagai logam yang tidak *mobile* karena bercampurnya logam pada zat humus stabil (Paradelo et al, 2010). Sedangkan logam yang

berada pada fraksi residual terikat erat pada struktur kristal dari mineral dan susah lepas dari tahanan kisi kristal. Hal ini mengindikasikan logam berada pada bentuk stabil dan dapat dianggap tidak tersedia untuk penyerapan tanaman (Zhu et al, 2014).

Potensial mobilitas dan bioavailabilitas logam Cu pada kedua kompos dapat dievaluasi dengan membandingkan jumlah logam Cu yang berada pada F-1 hingga F-3 (fraksi *mobile*) dengan jumlah Cu yang berada pada F-4 dan F-5 (fraksi stabil). Lihat Gambar 6 di bawah.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Fraksi Stabil dan Mobile Logam Cu Pada Kompos

Pada gambar di atas terlihat bahwa persentase logam Cu pada fraksi stabil lebih besar dibandingkan pada fraksi *mobile*. Hal ini mengindikasikan bahwa logam Cu yang terkandung pada kompos

tidak memberikan efek fitotoksisitas yang signifikan apabila diaplikasikan ke tanah. Hal ini dikarenakan logam Cu memiliki afinitas yang tinggi pada bahan organik sehingga tidak mudah termobilisasi pada proses pengomposan. Ion Cu secara langsung terikat pada dua atau lebih kelompok organik fungsional terutama karboksilat, karbonil, dan kelompok fenol (Nomedata et al, 2008)

7. Analisis Kualitas Kompos

Untuk parameter fisik-kimia kompos, perbandingan karakteristik kompos akhir pada penelitian ini dengan standar kualitas kompos yang berlaku dapat dilihat pada Tabel 1 berikut :

Tabel 1. Perbandingan Kualitas Kompos yang Dihasilkan dengan Standar Kualitas Kompos yang Berlaku

Parameter	Satuan	Nilai Kompos Akhir	SNI No. 19-7030-2004
Suhu	°C	31,20	Suhu air tanah
Kadar air	%	60,05	Maks. 50
Kandungan bahan organik	%	72,85	27 – 58
Rasio C/N	-	12,81	10 – 20

Jika dilihat pada Tabel 1 di atas, parameter kadar air dan kandungan bahan organik melebihi dari SNI

yang berlaku. Hal ini dapat dikarenakan proses maturasi atau pematangan kompos yang belum selesai. Fase maturasi merupakan fase yang berlangsung relatif lebih lama dibandingkan fase pengomposan lainnya bergantung dari bahan baku yang digunakan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hartlieb et al (2003), proses maturasi pengomposan berlangsung pada hari ke 78 hingga hari ke 100 pada pengomposan sampah organik rumah tangga dengan metode in-vessel. Pada penelitian ini, pengomposan berlangsung selama 48 hari dimana terdapat kemungkinan bahwa belum semua bahan organik yang dapat terdegradasi berhasil didegradasi oleh mikroorganisme. Sehingga, dibutuhkan waktu pengomposan yang lebih lama hingga akhirnya nilai kadar air dan kandungan bahan organik memenuhi kriteria kompos yang berlaku.

Faktor lain yang berpengaruh adalah suhu pengomposan yang tidak mencapai optimal. Suhu merupakan indikator dari aktivitas mikroorganisme. Umumnya proses degradasi bahan organik akan berlangsung lebih cepat pada suhu tinggi (termofilik). Sedangkan pada penelitian ini suhu termofilik tidak tercapai. Hal ini menyebabkan proses dekomposisi berjalan secara

lambat sehingga kandungan bahan organik akhir pada hari ke 48 pengomposan masih melebihi nilai yang disarankan. Selain itu suhu yang rendah menyebabkan penurunan kadar air yang rendah pula karena penguapan yang terjadi akibat panas tidak berlangsung secara optimal.

Perbandingan antara batas konsentrasi logam pada kompos di Indonesia dengan negara lain maka dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah :

Tabel 2. Perbandingan Konsentrasi Logam pada Kompos dengan Standar yang Berlaku

Logam Berat	Konsentrasi Logam (mg/kg)						
	Kompos	SNI 19-7030-2004	Poland ¹	Spain ¹	Australia ¹	US ²	Belgium ³
Cu	150,40	100	300	450	200	300	300

Jika dibandingkan dengan SNI No. 19-7030-2004 yang merupakan standar kualitas kompos milik Indonesia, maka konsentrasi logam Cu belu, memenuhi kriteria yang disyaratkan. Hal ini disebabkan karena bahan baku campuran kompos pada penelitian ini adalah limbah lumpur, sedangkan SNI No. 19-7030-2004 merupakan standar kualitas kompos yang dapat bersumber dari berbagai macam limbah organik domestik yang kandungan logam beratnya tidak sebesar logam berat pada limbah lumpur. Oleh karena itu, penilaian terhadap konsentrasi logam pada penelitian ini dapat mengacu pada standar dari negara lain yang sudah menetapkan batas konsentrasi maksimal logam berat yang

diperbolehkan untuk kompos yang bersumber dari limbah lumpur.

Meskipun konsentrasi logam Cu pada penelitian ini melebihi batas yang disarankan, tetapi kedua logam ini tidak memberikan efek toksik pada lingkungan jika ditinjau dari bentuk spesiasi kimianya. Hal ini dikarenakan berdasarkan hasil pemeriksaan spesiasi kimia, konsentrasi tertinggi kedua logam dominan berada pada fraksi stabil. Fraksi stabil pada logam dikenal sebagai fraksi dengan tingkat toksisitas yang rendah karena logam yang berada pada fraksi ini bersifat immobile dan tidak mudah lepas ke lingkungan.

Meskipun demikian, penilaian terhadap resiko yang dihasilkan dari tingkat konsentrasi total kedua logam pada kompos ini tetap menjadi hal yang penting untuk dilakukan. Potensi resiko yang dihasilkan dari masing-masing logam dievaluasi dengan menggunakan faktor *Ecological Risk* (E_r). Faktor ini menentukan potensi resiko ekologi yang dihasilkan suatu logam dengan tidak melihat fraksinasi logamnya melainkan dari total konsentrasi logam tersebut. Adapun rumus perhitungannya adalah sebagai berikut (Zhu et al, 2012) :

$$E_r = T_r \times \frac{C}{C_n}$$

dimana T_r adalah faktor respon toksik logam, C adalah konsentrasi logam pada kompos, C_n adalah nilai ambang batas konsentrasi logam, E_r adalah potensi resiko kontaminasi dari suatu logam. Penilaian terhadap tingkat resiko ekologi berdasarkan nilai E_r dapat dibagi menjadi 5 kelompok (Zhu et al, 2012), seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3 berikut ini :

Tabel 3. Indeks dan Nilai Potensi Kontaminasi Logam

E_r	Tingkat Resiko Ekologi Logam Tunggal
$E_r < 40$	Resiko rendah
$40 \leq E_r < 80$	Resiko sedang
$80 \leq E_r < 160$	Resiko cukup tinggi
$160 \leq E_r < 320$	Resiko tinggi
$E_r \geq 320$	Resiko sangat tinggi

Sumber : Zhu et al, 2012

Pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan nilai E_r lumpur awal dan E_r lumpur pada kompos akhir untuk membandingkan tingkat resiko ekologi yang terdapat pada lumpur sebelum dan sesudah proses pengomposan. Pada perhitungan faktor E_r kompos akhir, nilai ambang batas konsentrasi logam berat pada kompos (C_n) mengacu pada SNI No. 19-7030-2004. Begitu juga halnya dengan perhitungan faktor E_r pada lumpur awal dimana nilai C_n juga mengacu pada SNI No. 19-7030-2004

dikarenakan lumpur tersebut merupakan bahan baku pada proses pengomposan yang akan menjadi produk kompos nantinya. Nilai faktor T_r berbeda-beda untuk jenis tiap logam sesuai dengan efek toksiknya pada lingkungan. Berdasarkan Fiori et al (2013), urutan toksisitas atau faktor T_r pada beberapa jenis logam adalah $Hg=40 > Cd=30 > Cu=Pb=5 > Cr=2 > Zn=1$.

Setelah dilakukan perhitungan, rekapitulasi nilai E_r yang dihasilkan pada lumpur awal dan kedua kompos dapat dilihat pada Tabel 4berikut :

Tabel 4. Nilai E_r pada Kompos

Jenis Logam	E_r lumpur awal	E_r kompos akhir
Cu	32,01	7,52

Sumber : Hasil Olahan, 2020

Dari tabel di atas diketahui bahwa nilai faktor E_r logam Cu pada lumpur awal adalah 32,01. Setelah dilakukan pengomposan, nilai E_r logam Cu adalah 7,52. Nilai E_r logam Cu pada kompos yang dihasilkan lebih rendah dari nilai E_r lumpur awal sebelum dilakukan pengomposan. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat resiko ekologi pada lumpur mengalami penurunan dengan adanya proses pengomposan.

Selain itu, nilai E_r logam pada kompos juga lebih rendah dari 40 ($E_r < 40$) sehingga dapat disimpulkan bahwa keberadaan logam Cu pada kompos memiliki resiko ekologi yang rendah dan dapat digunakan sebagai amandemen tanah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Pada akhir pengomposan suhu kompos sebesar 31°C, nilai C/N sebesar 12,81 kandungan bahan organik adalah 72,85% dan untuk kadar airnya sebesar 60,05%
2. Pada akhir pengomposan, konsentrasi logam Cu pada kompos sebesar 150 mg/kg. Konsentrasi logam ini masih melebihi konsentrasi logam yang diizinkan pada kualitas akhir kompos berdasarkan SNI No. 19-7030-2004. Meskipun demikian, besarnya resiko logam Cu terhadap lingkungan adalah rendah sehingga kompos dapat dipertimbangkan untuk diaplikasikan ke tanah.
3. Proses pengomposan telah mengurangi efek toksisitas dan mobilitas logam Cu. Spesiasi kimia dari logam Cu dominan pada fraksi carbonate bound. Logam tersebut berada pada fraksi yang stabil sehingga tidak mudah lepas ke lingkungan dan memiliki efek fitotoksik yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., & Revel, J.-C. (2005). Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Journal of Chemosphere*, 801-810.
- [2] Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 19-7030-2004 : Spesifikasi Kompos dari Sampah Organik Domestik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [3] Banegas, V., Moreno, J., Moreno, J., Garcia, C., Leon, G., & Hernandez, T. (2007). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Journal of Waste Management*, 1317-1327.
- [4] Fuentes, A., Llorens, M., Saez, J., Soler, A., Aguilar, M. I., Ortuno, J. F., et al. (2004). Simple and Sequential Extraction of Heavy Metals from Different Sewage Sludges. *Journal of Chemosphere*, 1039-1047.
- [5] Guo-Di, Z., Ding, G., Tong-Bin, C., & Wei, L. (2007). Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting. *Journal of Hazardous Materials*, 216-221.
- [6] He, M., Li, W., Liang, X., Wu, D., & Tian, G. (2009). Effect of composting process on phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead in sewage sludge and swine manure. *Journal of Waste Management*, 590-597.
- [7] Jakubus, M., & Czekala, J. (2001). Heavy Metal Speciation in Sewage Sludge. *Journal of Environmental Studies*, 245-250.
- [8] Kalamdhad, A., & Kazmi, A. (2009). Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. *Journal of Chemosphere*, 1327-1334.
- [9] Khalil, A., Hassouna, M., El-Ashqar, H., & Fawzi, M. (2011). Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge. *Microbiology Biotechnology*, 2359-2369.
- [10] Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 142-156.
- [11] Villasenor, J., Rodriguez, L., & Fernandez, F. (2011). Composting Domestic Sewage Sludge With Natural Zeolites In a Rotary Drum Reactor. *Journal of Bioresource Technology*, 1447-1454.
- [12] Yanez, R., Alonso, J., & Diaz, M. (2009). Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Journal of Bioresource Technology*, 5827-5833.
- [13] Zhu, H.-n., Yuan, X.-z., Zeng, G.-m., Jiang, M., Liang, J., Zhang, C., et al. (2012). Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1470-1